

Guy Richard, Pierre Stengel,
Gilles Lemaire, Pierre Cellier,
Egizio Valceschini, coord.

UNE AGRONOMIE POUR LE XXI^e SIÈCLE

Éditions Quæ

© Éditions Quæ, 2019.
ISBN : 978-2-7592-2937-6
e-ISBN (NUM) : 978-2-7592-2938-3
x-ISBN (ePub) : 978-2-7592-2939-0

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

Préface – <i>Philippe Mauguin</i>	7
Introduction – <i>Guy Richard, Pierre Stengel, Gilles Lemaire, Pierre Cellier, Egizio Valceschini</i>	9

PARTIE I

Un département Environnement et Agronomie à l'Inra : une stratégie de recherche

Chapitre 1. L'environnement et l'agronomie à l'Inra : essai d'analyse historique d'une mise en convergence

L'impossible greffe de la problématique environnementale dans la matrice productiviste des décennies modernisatrices	17
La discipline agronomique face à la problématique environnementale : de la traduction à la conversion (1973-1989)	18
La rupture de l'agronomie avec la finalité productiviste (1990-1995)	19
Adapter l'organisation de la recherche agronomique au développement durable (1996-1999)	23
Conclusion	29

Chapitre 2. Ambitions, programmation stratégique et productions scientifiques

Analyse des orientations exprimées dans les quatre schémas stratégiques du département	41
Évolution du dispositif scientifique et des compétences	42
Évolution de la production scientifique	48
Conclusion	50

Chapitre 3. Un positionnement international original pour l'agronomie

Une approche française de l'agronomie	55
L'écophysiologie, une contribution française forte et reconnue	56
Le vertueux couplage de l'agronomie et de l'environnement : une ambition internationale	57

Chapitre 4. Environnement et agriculture : un terrain pour l'expertise scientifique

L'expertise scientifique au service du savoir commun et de la décision collective	60
L'engagement du département dans les expertises collectives de l'Inra	60
Les expertises nourrissent la recherche	62
Les recherches ont des impacts	65

PARTIE II

Les recherches sur les agroécosystèmes : les nouveaux enjeux du xxi^e siècle

Chapitre 5. La prise en charge de l'enjeu climatique dans les recherches du département

Émissions de gaz à effet de serre et atténuation	69
Impacts du changement climatique	70
Adaptation au changement climatique	71
Conclusion	79

Chapitre 6. Agriculture et qualité de l'air : recherche et appui aux politiques publiques	90
Une pollution d'origine agricole emblématique : les émissions d'ammoniac	91
La complexité de la pollution atmosphérique vue du côté de l'agriculture	98
Perspectives	105
La dissémination des OGM dans les paysages agricoles	107
Chapitre 7. La biodiversité : menaces et ressources	110
Agronomie et biodiversité : l'émergence des grandes orientations	111
Agronomie et fonctions écologiques de la biodiversité : les mains dans le moteur	114
Des fonctions écologiques aux services écosystémiques : les bases de l'avenir	120
Impacts de l'agriculture sur la biodiversité	123
PARTIE III	
Des instruments pour l'étude des agroécosystèmes	125
Chapitre 8. Les infrastructures d'observation et d'expérimentation : vers une dynamique européenne	126
Des travaux en agronomie historiquement basés sur des expérimentations de longue durée	126
L'émergence de nouvelles infrastructures de recherche	127
Les infrastructures d'observation et d'expérimentation du département	
Environnement et Agronomie	129
L'ouverture et la diffusion des données	130
Conclusion	134
La télédétection, proche ou lointaine, pour le suivi des ressources agricoles et environnementales et l'amélioration variétale	135
Chapitre 9. Modélisation du fonctionnement des agroécosystèmes : l'épopée Stics	138
Genèse et positionnement du modèle, au carrefour des trois anciens départements, dans une visée agroenvironnementale	138
La gouvernance du modèle Stics : un modèle collectif innovant	140
Des usages au service de l'amélioration des systèmes de culture	143
Au service de questions globales, par modularisation et couplage	144
Le changement du climat, un cas d'étude emblématique	145
Les défis d'aujourd'hui : vers un modèle pour l'agroécologie ?	147
Chapitre 10. L'évaluation multicritère des systèmes agricoles : une révolution des méthodes	150
Une conception pragmatique de l'évaluation : les travaux pionniers et critiqués de l'Inra de Colmar	151
Une phase de maturation scientifique et de reconnaissance institutionnelle de l'évaluation multicritère	153
Une phase d'extension des méthodes d'évaluation multicritère	156
Conclusion	161
PARTIE IV	
Connaître et évaluer les ressources et les services des agroécosystèmes	163
Chapitre 11. Un renouveau pour l'étude des sols	164
Du sol à l'écosystème, la fusion des départements Science du sol, Bioclimatologie et Agronomie	164

Des menaces aux services : une vision renouvelée de la place des sols dans les écosystèmes	168
Le <i>leadership</i> mondial en science du sol : de la recherche à la politique	172
Conclusion	175
Microbiologie des sols	177
Les contaminations chimiques de l'environnement : les défis de l'écotoxicologie	180
Chapitre 12. Des recherches pour une gestion intégrée de la ressource en eau dans les territoires agricoles	182
Les orientations stratégiques	183
La gestion quantitative de l'eau	188
La gestion qualitative de l'eau dans les contextes de pollution forte des eaux	190
Conclusion	192
Chapitre 13. Bouclage des cycles : des approches renouvelées et plus englobantes des cycles biogéochimiques	194
La gestion de la fertilisation et l'analyse des cycles à l'échelle de la parcelle	196
Vers des approches plus englobantes des cycles des éléments pour conjuguer agronomie et environnement	202
Gestion durable des flux d'éléments dans les agroécosystèmes	208
Conclusion	211
Un renouvellement indispensable des paradigmes qui ont fondé la fertilisation des cultures en agronomie	213
Chapitre 14. La rhizosphère : des interactions racine-sol-micro-organismes aux leviers de l'agroécologie	215
Concept de rhizosphère et enjeux de connaissance	215
La rhizosphère dans le monde aujourd'hui et demain : vers de nouveaux enjeux	220
La rhizosphère au cœur des défis de la transition agroécologique	223
PARTIE V	
Concevoir des systèmes agricoles pour un futur durable	225
Chapitre 15. La conception des idéotypes	226
Liens génotype-phénotype : un tournant pour l'écophysiologie dans les années 1990	226
Qu'est-ce qu'un idéotype et à quoi sert-il ?	227
Des modèles à base de processus pour la recherche d'idéotypes	228
Apparition de méthodes et de démarches adaptées pour la recherche d'idéotypes	230
Le réseau Qualité des produits récoltés, un acteur des recherches sur les idéotypes	230
Conclusion	231
Pistes pour le futur... vers un changement de paradigme ?	231
Quelles recherches sur la qualité des produits ?	233
Chapitre 16. Protection intégrée des cultures : d'une combinaison de techniques à une valorisation de la biodiversité	235
Mise en perspective de la contribution des agronomes du département à la protection intégrée des cultures	235
1998 : la nouvelle donne	237
1999-2003 : la mobilisation	238
2004-2006 : la consolidation	239
1999-2006 : les résultats de la dynamique scientifique	241
À partir de 2007 : des développements encouragés par les politiques publiques	242

À partir de 2007 : les agronomes du département élargissent leur champ d'activités	244
Aujourd'hui et demain : une protection intégrée des cultures encore plus biodiversifiée	246
Chapitre 17. Vers une gestion territoriale du recyclage des matières organiques résiduelles	247
Un développement et une structuration des recherches à l'Inra pour répondre à des enjeux sociétaux	249
Évaluation des filières du traitement jusqu'à la valorisation au champ	252
Quels impacts environnementaux au champ associés à la présence de contaminants dans les produits résiduels organiques ?	257
Intégration des effets et gestion territoriale	258
Conclusions et perspectives	261
Chapitre 18. La conception de systèmes agroécologiques	264
La maturité du concept de système de culture	265
L'élargissement de l'horizon spatial : de la parcelle au paysage et au territoire	267
Les connaissances mobilisées dans la conception : du règne des modèles à l'irruption des savoirs profanes	268
De la conception basée sur un diagnostic agronomique à la mobilisation des méthodes multicritères	270
De la conception par les agronomes à la conception par les agriculteurs	271
Le développement des expérimentations-système	273
L'élargissement du fossé entre la conception et l'analyse des processus	275
Conclusion	277
Étudier la conversion vers l'agriculture biologique : le cas des systèmes viticoles	278
Caractériser la diversité des formes d'agriculture	281
CONCLUSION	
Environnement et agronomie au ^{xxi}e siècle, et maintenant ?	283
Environnement, changements globaux et changements d'échelles : les défis du climat et de la gestion sobre des ressources	285
Agriculture et biodiversité, changement de paradigme : le temps de l'agroécologie	287
Alimentation et santé, le concept One Health : un monde en transition(s)	290
Et maintenant ?	294
Postface – Philippe Gillet	295
Annexe 1. Unités du département Environnement et Agronomie en 1998 et en 2018	298
Annexe 2. Départements de l'Inra en 2018	300
Liste des sigles	301
Liste des auteurs	303

Préface

L'environnement est aujourd'hui au cœur des priorités stratégiques de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra). Cet ouvrage nous montre que ceci résulte d'orientations construites progressivement et d'actions conduites sur le long terme auxquelles le département Environnement et Agronomie a largement contribué. À partir des intuitions initiales et des nécessités perçues dès les années 1970, un engagement collectif a permis de traduire en programmes de recherche des questions sur la protection et le respect de l'environnement. L'Inra a ainsi réussi un véritable élargissement de ses finalités et de ses compétences scientifiques.

La production agricole et alimentaire, principalement avec des objectifs de productivité, a constitué le point d'entrée privilégié des recherches menées à l'Inra jusqu'aux années 1980. L'importante réforme que mes prédécesseurs ont menée à partir de la fin des années 1990, qui s'est notamment traduite par l'adoption du tripode « agriculture, alimentation, environnement », a conduit à des inflexions majeures sur les plans scientifique et organisationnel.

La création, en 1998, des départements Environnement et Agronomie (EA) et Santé des plantes et environnement (SPE) a ancré la durabilité environnementale des systèmes agricoles et alimentaires à l'Inra comme une finalité pour de nouvelles orientations de recherche et d'innovation, dont se sont emparés depuis l'ensemble des départements. Cette évolution s'est appuyée sur un changement de paradigme scientifique et sur la grande capacité d'adaptation des équipes de recherche et des structures. Au cours de ces vingt dernières années, l'Inra a démontré ses capacités à redéfinir ses fronts de science, à réorienter ses dispositifs et ses compétences scientifiques et, finalement, à produire des connaissances scientifiques dans un nouveau champ de la recherche finalisée. Cette évolution majeure a été possible grâce à la mobilisation de tout l'institut. La direction générale, les directions scientifiques, les départements et les unités ont porté la programmation afin que la nouvelle orientation stratégique entre dans la réalité de l'institut. Les équipes de recherche ont revisité leurs programmes et fait évoluer leurs compétences pour répondre aux nouveaux enjeux.

Le département EA, ses chefs de département successifs et tous ses personnels scientifiques, techniques et administratifs, ont donné corps à cette nouvelle orientation sans cesser d'améliorer la qualité scientifique des travaux. Par la réunion des trois anciens départements d'Agronomie, de Bioclimatologie et de Science du sol, le département EA a mis en synergie un couple « improbable » : une discipline scientifique, l'agronomie, et un champ d'enjeux, l'environnement. À partir de cette association, il a entrepris de renouveler les thématiques de recherche, d'« écologiser » les approches, d'élargir et d'articuler les échelles spatiales, de coupler les facteurs abiotiques et biotiques du fonctionnement des écosystèmes... Si la production de connaissances scientifiques a bien sûr animé ce renouvellement, la volonté de contribuer à la construction d'une agronomie pour le ^{XXI}^e siècle au service des agriculteurs et des citoyens a eu une importance cruciale.

Les années 2000, et notamment les perspectives Agrimonde et Agrimonde-Terra, ont confirmé que nourrir le monde était un impératif qui ne pouvait pas

être atteint sans prendre en compte, d'une part, la question de la raréfaction et du renouvellement des ressources naturelles et, d'autre part, la protection et la préservation de l'environnement. Le département EA est aujourd'hui un des piliers de la stratégie de l'établissement pour répondre à certains des objectifs exposés dans son document d'orientation Inra 2025, notamment la réduction drastique de l'utilisation des pesticides de synthèse et la neutralité carbone de l'agriculture française. Néanmoins, seule une approche pluridisciplinaire permettra de relever le défi de la transition agroécologique de l'agriculture en conjuguant performances économiques et environnementales. Il sera également essentiel d'assurer le transfert des innovations vers les agriculteurs, en partenariat avec les instituts techniques, l'enseignement agricole et les acteurs du développement.

La célébration des 20 ans du département EA nous fournit l'occasion de nous interroger sur les questions clés que devra se poser la recherche agronomique dans les vingt prochaines années. Il s'agira, dans le cadre d'approches systémiques, de concevoir des systèmes alimentaires sains et durables prenant en compte les interconnexions entre agriculture, environnement et alimentation. Ces systèmes alimentaires devront fournir une nourriture saine et de qualité aux dix milliards d'habitants de la planète attendus pour 2050, tout en luttant contre le réchauffement climatique et en préservant les ressources naturelles et la biodiversité. L'Inra, avec ses partenaires scientifiques nationaux, européens et internationaux, se mobilisera pour répondre à ces enjeux. Le département EA aura un rôle important à jouer pour concevoir et mettre en œuvre de nouvelles approches basées sur l'intégration des connaissances, en travaillant en étroite relation avec les autres départements de l'Inra intervenant dans les domaines de la biologie, des productions végétales et animales, de la nutrition, de la modélisation et du numérique, et des sciences économiques et sociales.

Pour finir, je tiens à souligner combien la création du département EA représente une expérience emblématique de la capacité de l'Inra à assumer des décisions stratégiques de grande ampleur pour prendre en compte l'évolution des connaissances et des enjeux sociétaux. Je souhaite rendre hommage aux chercheurs, aux ingénieurs et aux techniciens qui, dans les laboratoires comme dans les unités expérimentales, ont mis en œuvre avec succès les orientations stratégiques du département au cours des vingt dernières années. Je suis convaincu qu'ils sauront, avec le même enthousiasme et avec la compétence qui les caractérisent, relever les nouveaux défis du département Environnement et Agronomie.

*Philippe Mauguin,
président-directeur général de l'Inra*

CHAPITRE 9

Modélisation du fonctionnement des agroécosystèmes : l'épopée Stics

Nicolas Beaudoin, Marie Launay, Dominique Ripoché, Samuel Buis, Éric Justes, Françoise Ruget, Guillaume Jégo, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, Joël Léonard, Hélène Raynal, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Bernard Seguin, Françoise Lescourret, Jean-Noël Aubertot, Florence Habets, Pierre-Alain Jayet, Philippe Gate, Bruno Mary

Cette épopée doit beaucoup à la regrettée Nadine Brisson, première capitaine de « l'embarcation Stics ». Nous lui dédions avec émotion ce chapitre, dont les axes reprennent ceux de l'hommage qui lui a été rendu le 16 octobre 2012 conjointement par le département Environnement et Agronomie (EA) de l'Inra et l'Association française d'agronomie¹²³.

Le modèle Stics (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard) a plus de vingt ans. Il fait maintenant partie des cinq modèles de culture les plus cités au monde. Cette *success story* s'est fondée sur un projet collectif dont le creuset a été le département EA naissant. Ce texte tente une analyse réflexive des interactions entre un groupe élargi de chercheurs modélisateurs et la nécessité de mobiliser des moyens sur une très longue durée, marquée par le renouvellement des questions posées face à l'évolution rapide des usages et des contextes d'application.

► Genèse et positionnement du modèle, au carrefour des trois anciens départements, dans une visée agroenvironnementale

Genèse du modèle

En 1996, il existait déjà au niveau international des modèles agronomiques avec une diversité d'orientations, écophysiologique (ex. : Sucros), biogéochimiste

123. AFA : <http://agronomie.asso.fr/lagronomie-pour-tous/empreintes-dagronomes/nadine-brisson/>.

(ex. : Pastis, Century) ou généraliste sol-culture (ex. : Ceres, EPIC, Apsim, Cropsys). Des équipes Inra privilégiaient leur adaptation aux conditions françaises, tandis que d'autres cherchaient à créer de nouveaux modèles, souvent très spécifiques en termes de processus ou de cultures.

Stics est né de l'Action incitative programmée Inra, Ecospace, « Hétérogénéité des milieux cultivés », qui offrait l'occasion de croiser des compétences des trois anciens départements : Bioclimatologie, Agronomie et Science du sol. La création de ce nouveau modèle s'inscrivait dans la visée agroenvironnementale du nouveau département. La première version vint de la fusion de BYM-GOA (croissance de la plante) et de Lixim (minéralisation et lixiviation du nitrate) ; elle fut appliquée aux cultures de blé et de maïs.

Stics a ensuite évolué en se nourrissant des problématiques émergentes, et très diverses : estimation des potentialités de production régionales, besoins en eau et en azote des cultures, lixiviation du nitrate en fonction des pratiques agricoles, agriculture de précision incluant l'assimilation de données de télédétection, prévision de la production fourragère française, adaptation au changement climatique, valorisation des cultures intermédiaires. Dans les dernières années, les problématiques abordées se sont encore élargies à l'évaluation de systèmes de culture dits « agroécologiques », de cultures associées, de cultures pérennes dédiées à la bioénergie, des GES et de la séquestration à long terme de carbone dans le sol.

Cette trajectoire est redevable au formidable charisme et à l'énergie de Nadine Brisson, qui a noué nombre de collaborations avec des chercheurs aux compétences et affiliations variées, et avec des experts des instituts techniques. Stics s'est construit collectivement, à l'interface entre des problématiques scientifiques et finalisées. Suite au décès de Nadine, le relais a été pris par l'équipe projet Stics.

Spécificités de Stics

Le cahier des charges de Stics, coconstruit en 1996, prônait quatre qualités :

- l'équilibre entre les différents compartiments et processus interagissant dans le système sol-plante-atmosphère, qui permet d'obtenir un modèle généraliste, applicable sur une large diversité de thématiques et de contextes ;
- la généricité de la description du fonctionnement de la plante, basée sur des concepts écophysiologiques non spécifiques d'une espèce, qui se concrétise par l'existence d'un seul modèle ;
- la simplicité et la sobriété en données d'entrée, avec des paramètres aisément accessibles et peu sensibles au changement d'échelle, qui facilite son utilisation opérationnelle en situations agricoles réelles ;
- la robustesse des formalismes et du paramétrage, qui assure le réalisme dans une large gamme de conditions agroenvironnementales.

Une cinquième qualité, l'évolutivité, s'est imposée au cours du temps. La stratégie a été de concevoir collectivement un modèle dynamique, fonctionnel, mono-dimensionnel, avec une visée agroenvironnementale affirmée. Le modèle peut réaliser des simulations depuis l'échelle parcellaire (modèle seul) jusqu'à l'échelle macro-régionale, mais uniquement en couplage avec d'autres modèles ou outils.

L'intégration dans la communauté scientifique nationale et internationale

La pertinence du cahier des charges et l'efficacité de la construction collective se sont vérifiées par nombre de collaborations scientifiques, partenariats ou

expertises produites. Début 2018, Stics avait été utilisé dans 282 articles scientifiques et 63 thèses. Il est intégré dans de nombreuses plateformes de modélisation. En plus de ses équipes fondatrices, le développement de Stics a associé d'autres forces de l'Inra (départements SAD, MIA, Phase), des instituts de recherche (Cirad, Irstea et CEA), des universités et des écoles d'ingénieurs, ainsi que du développement agricole (instituts techniques, chambres d'agriculture, Agro-Transfert).

Du point de vue international, Stics a servi dès sa création à des travaux du Cirad, au projet européen APES puis aux réseaux COST¹²⁴. Suite au projet Climator (analyse de l'effet du changement climatique sur la production agricole), il a contribué aux exercices d'inter-comparaison de modèles, AgMIP (échelle mondiale) puis Macsur (Europe), et plus récemment CN-MIP (échelle mondiale, protoxyde d'azote, N₂O). Stics est mobilisé sur la question du changement du climat aux côtés des grands modèles mondiaux (ex. : modèles de Wageningen, DSSAT, Apsim, Cropsyst), avec un nombre de citations comparable à ceux-ci (symposium iCropM, 2016).

► La gouvernance du modèle Stics : un modèle collectif innovant

Une gouvernance collective affirmée

Depuis sa création, Stics est l'outil d'un collectif mixte de concepteurs et d'utilisateurs se réunissant tous les deux ans : le groupe des utilisateurs de Stics (GUS). L'explosion des demandes d'application a conduit toutefois à une instabilité du code vers 2004-2006. Le GUS a alors réaffirmé la priorité de robustesse de Stics et institué l'équipe projet Stics pour en assurer la gouvernance. Celle-ci a décidé de dissocier la version standard, seule diffusée, des versions de recherche (voir ci-dessous), et de publier un ouvrage de référence sur les bases scientifiques et techniques de Stics.

L'équipe projet Stics se compose actuellement de 24 volontaires (tableau 9.1) pour gérer la construction itérative du modèle *via* cinq tâches : garantir la performance et la robustesse de la version standard de Stics ; assurer son évolution en collaborant à la construction de versions « de recherche » ; représenter le modèle aux niveaux national et international ; animer la communauté des utilisateurs ; diffuser l'information sur le modèle et dispenser des formations pour son utilisation experte.

Cette embarcation tient le cap grâce à deux flotteurs essentiels : le GUS, une communauté grandissante reconnue comme réseau scientifique Inra-EA ; le département EA, dont le soutien est essentiel grâce à des échanges réguliers.

Un double défi scientifique et technique

La performance de prédiction d'un modèle est fonction du réalisme de son schéma conceptuel, de la fiabilité du code et de la qualité du paramétrage. Plusieurs initiatives de l'équipe projet Stics ont permis de progresser sur chacun de ces aspects : – le système de gestion, qui trace l'évolution des sources et du paramétrage et

124. APES : Agricultural Production and Externalities Simulator ; COST : Coopération européenne en science et technologie.

Tableau 9.1. Composition en 2018 de l'équipe projet Stics et de son bureau.

<i>Éric Justes</i>	Cirad UMR System Montpellier
<i>Dominique Ripoché</i>	Inra US Agroclim Avignon
<i>Marie Launay</i>	Inra US Agroclim Avignon
<i>Samuel Buis</i>	Inra UMR Emmah Avignon
François Affholder	Cirad UPR AIDA, Montpellier
Nicolas Beaudoin	Inra UR AgrolImpact Laon
Patrick Bertuzzi	Inra US Agroclim Avignon
Eric Casellas	Inra MIAT Record Castanet-Tolosan
Julie Constantin	Inra UMR AGIR Castanet-Tolosan
Benjamin Dumont	Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech
Jean-Louis Durand	Inra UR P3F Lusignan
Inaki Garcia de Cortazar-Atauri	Inra US Agroclim Avignon
Fabien Ferchaud	Inra UR AgrolImpact Laon
Anne-Isabelle Graux	Inra UMR Pegase Rennes
Guillaume Jégo	Agriculture et Agroalimentaire Canada Québec
Christine Le Bas	Inra US InfoSol Orléans
Patrice Lecharpentier	Inra US Agroclim Avignon
Joël Léonard	Inra UR AgrolImpact Laon
Florent Levavasseur	Inra UMR EcoSys Grignon
Gaëtan Louarn	Inra UR P3F Lusignan
Alain Mollier	Inra UMR ISPA Bordeaux
Bruno Mary	Inra UR AgrolImpact Laon
Françoise Ruget	Inra UMR Emmah Avignon
Loïc Strullu	ASAE Reims

En italique, les membres du bureau de l'équipe projet Stics. ASAE : Association de suivi agronomique des épandages.

permet de combiner la rigueur de l'ingénierie pour la version standard et la créativité pour les versions de recherche (ambidextrie organisationnelle) ;

– l'évaluation systématique des performances globales du modèle, qui se base à la fois sur un système automatisé mobilisant plus de 3 000 jeux de données expérimentaux, et sur une analyse collective régulière des résultats *via* l'équipe projet Stics. La première expérience a fait l'objet d'une publication remarquée (figure 9.1) ;

– le développement modulaire du code pour assurer sa lisibilité, son évolutivité, sa documentation et sa cohérence entre versions ;

– le partage des méthodes et outils développés, notamment pour l'évaluation ou l'adaptation à de nouvelles espèces (Stics_EvalR, OptimiStics).

Une stratégie de consolidation du collectif et d'ouverture internationale

L'équipe projet Stics, constituée sur la base du volontariat, offre une riche diversité de compétences et une capacité démultipliée de veille scientifique. Ses limites sont la faible disponibilité de chaque chercheur, en dehors du pôle informatique. La réponse donnée est la mutualisation des tâches et l'internationalisation de l'équipe projet (tableau 9.1). Un nouveau défi est de capitaliser sur

les formations réalisées dans différents pays (Sri Lanka, Inde, Chine) et sur l'implication dans les projets internationaux (AgMIP, Macsur, CN-MIP). Cela passera notamment par la réussite du projet IdeStics (International Database for Evaluation of Stics), qui vise l'extension et la qualification de la base de données Stics, et qui est soutenu par le département EA.

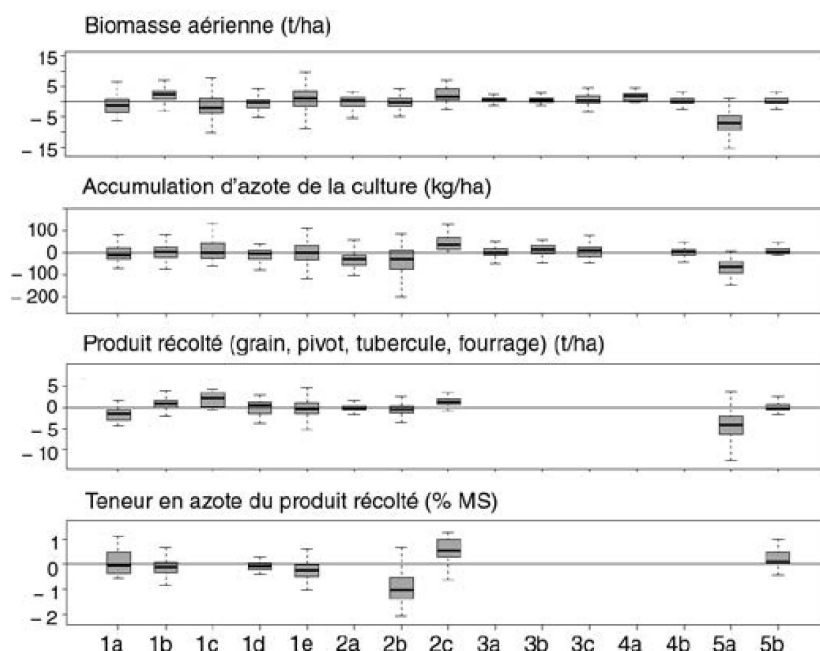


Figure 9.1. Distribution des résidus de prédiction par le modèle Stics v7 de quatre variables agroenvironnementales pour 15 cultures d'intérêt, pour 1 809 unités de simulation à l'échelle de la parcelle-année en France (MS : matière sèche) (Coucheney *et al.*, 2015).

1. Céréales : 1a, orge de printemps ; 1b, blé dur ; 1c, maïs grain ; 1d, orge d'hiver ; 1e, blé d'hiver ;
2. Oléoprotéagineux : 2a, lin ; 2b, pois de printemps ; 2c, colza d'hiver ;
3. Cultures intermédiaires : 3a, moutarde ; 3b, radis ; 3c, ray-grass ;
4. Cultures fourragères : 4a, luzerne ; 4b, prairie ;
5. Cultures à développement indéterminé : 5a, betterave sucrière ; 5b, vigne.

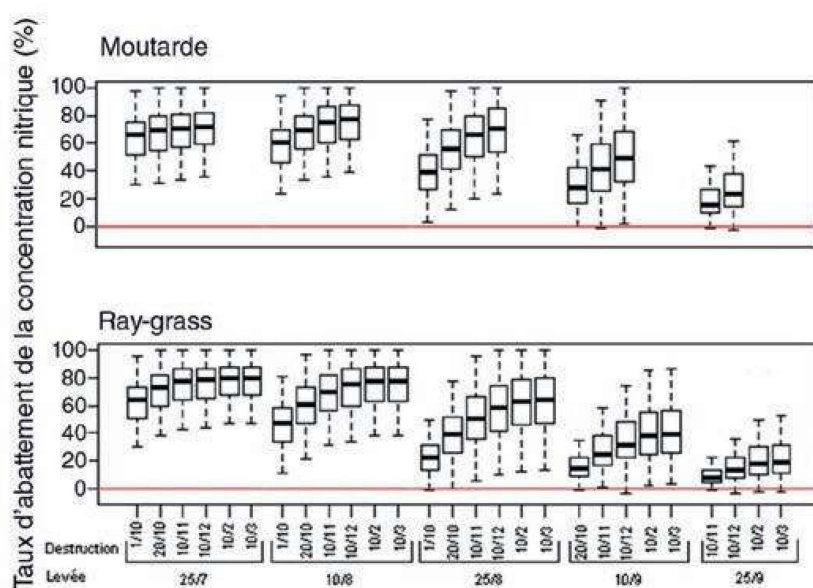


Figure 9.2. Concentration nitrique de l'eau de percolation simulée en fonction des modalités de gestion (dates de levée et de destruction) et de l'espèce de culture intermédiaire, moutarde ou ray-grass. Expertise Inra-DEPE pour le MAAF (Justes *et al.*, 2012).

► Des usages au service de l'amélioration des systèmes de culture

Le positionnement de Stics, à l'interface entre sciences et action, en fait un outil pour instruire certaines questions soulevées par la gestion des systèmes cultivés. Les enjeux structurants du département EA ont été utilisés ici comme clés d'analyse, en prenant comme matériel les articles scientifiques et l'expertise collective.

Gestion, protection et restauration des ressources air, eau et sol

L'évaluation de l'impact des mesures agroenvironnementales sur la pollution nitrique a bénéficié de la généricité multi-espèces de Stics, qui est distribué à l'échelle du bassin hydrologique *via* un système d'information géographique (Bretagne, Beauce, Picardie). Pour gérer les interactions entre unités spatiales, Stics a été couplé à des modèles hydrologiques ou économétriques. Concernant la protection de l'air, les usages portent sur le test de formalismes d'émission (ozone, O_3 , protoxyde d'azote, N_2O , et ammoniac, NH_3).

Bouclage des cycles N-P et stockage du carbone dans les sols

Les impacts de pratiques isolées ou de systèmes de culture sur les diverses pertes d'azote (NO_3 , N_2O , NH_3) ont été simulés à plusieurs échelles temporelles. Cela est favorisé par la généricité et la robustesse de la conceptualisation du cycle C-N interne du sol, pour une large gamme de sols, de systèmes de culture et de résidus organiques, exogènes ou endogènes. La généricité permet d'étudier les effets cumulatifs sur plusieurs rotations successives qui accroissent le stock et la minéralisation nette d'azote du sol.

Stics simule les émissions liées aux cycles C-N servant dans le calcul du bilan des GES (hors méthane, CH_4). Récemment, une description explicite de la dynamique de la biomasse racinaire (dans une version de recherche) a permis une simulation plus réaliste du stockage du C du sol à long terme. En complément, la modélisation de la dénitrification et des émissions de N_2O s'est avérée pertinente (projet CN-MIP).

Évaluation, conception et pilotage de systèmes agricoles multiperformants

Les tests de scénarios ou les prototypages de systèmes de culture innovants ont été conduits à différentes échelles (ANR MicMac, ANR Atcha, bassins bretons). Stics peut être couplé avec un modèle de décision, ce qui a permis, en particulier, de contribuer à instruire les problématiques d'atténuation et d'adaptation des systèmes de culture face au changement climatique (*smart agriculture*).

Paramétrage et test des prédictions de Stics

Parmi les publications, 19 % visent l'évaluation de la performance de prédiction. Outre l'évaluation formelle de Coucheney *et al.* (2015), la majeure partie traite de la conceptualisation d'un nouveau processus qui est conduite et valorisée comme tout projet scientifique. L'adaptation d'une nouvelle espèce à la version standard est souvent conduite comme un projet d'ingénierie ; ce travail indispensable est plus difficile à valoriser *per se* et doit être intégré aux projets qui en bénéficient.

Conclusions transversales

Une critique fréquente de Stics porte sur le nombre de ses paramètres. Cela vient du fait qu'aucun paramètre n'est écrit directement dans le code et que tous sont accessibles. Cet atout scientifique peut être une limite pour l'opérationnalité. Si besoin, la modularité du code permettrait d'en figer un grand nombre dans un outil *ad hoc*.

La performance de prédiction dépend de la qualité des paramètres dits « locaux », qui sont sous la responsabilité de l'utilisateur. Pour limiter les risques d'une pratique « presse-bouton », l'équipe projet s'est investie dans des sessions de formation à la modélisation et à l'utilisation de Stics pour favoriser un usage « adapté et raisonnable » du modèle.

La construction collective de Stics en fait un outil de formation et de synthèse de connaissances interdisciplinaires aux niveaux national et international. Pour le renouveler, continuer d'échanger sur ses bases conceptuelles est vital.

► Au service de questions globales, par modularisation et couplage

Stics a été conçu comme un modèle agroenvironnemental spatialement 1D pouvant être aisément distribué dans l'espace. Très tôt il a intéressé les scientifiques des disciplines connexes et a été utilisé à des échelles plus intégratrices ou pour aider à la compréhension de processus spatialement explicites tels que la dynamique de maladies, le transfert de pesticides (polluants), ou encore l'estimation des impacts des pollutions diffuses d'origine agricole (nitrate, pesticide) sur la ressource en eau.

Un dialogue interdisciplinaire vers une modularisation du code

L'utilisation du modèle dans le contexte de couplage à d'autres modèles et d'intégration dans les plateformes de modélisation a conduit dès 2006 à la refonte du code informatique et, en particulier, à une modularisation de la boucle journalière.

Dans ce contexte, en 2007, le pool informatique de l'équipe projet Stics a rédigé un cahier des charges, en lien avec la plateforme Record (pilotée par les départements EA, MIA, SAE2, Phase et SAD) et les partenaires utilisateurs du modèle : économistes, climatologues, hydrologues. Un travail de restructuration et de recodage complet du modèle, sous forme d'une bibliothèque de fonctions, a été entrepris et a permis le développement d'une nouvelle version nommée ModuloStics en 2008. Cette refonte a eu comme conséquence de favoriser l'emploi du code par d'autres concepteurs.

Les couplages hors plateforme et dans les plateformes

Hors plateforme, Stics a été couplé selon des formes et des finalités variées :

- comme générateur d'un métamodèle agroéconomique avec Aropa (figure 9.3), puis Artix (en cours de développement) ;
- en couplage interactif pour simuler le développement et l'impact de champignons pathogènes (Mila-Stics), le transfert des pesticides (PE-Stics), les problématiques d'agroforesterie (projet Hi-Safe) ;
- en fournissant des données des bilans en eau, C, N aux modèles : FlorSys (adventices), Macro (transfert des pesticides), SVAT-Orchidee (flux eau et C à l'échelle de l'Europe), Archisimple (architecture racinaire).

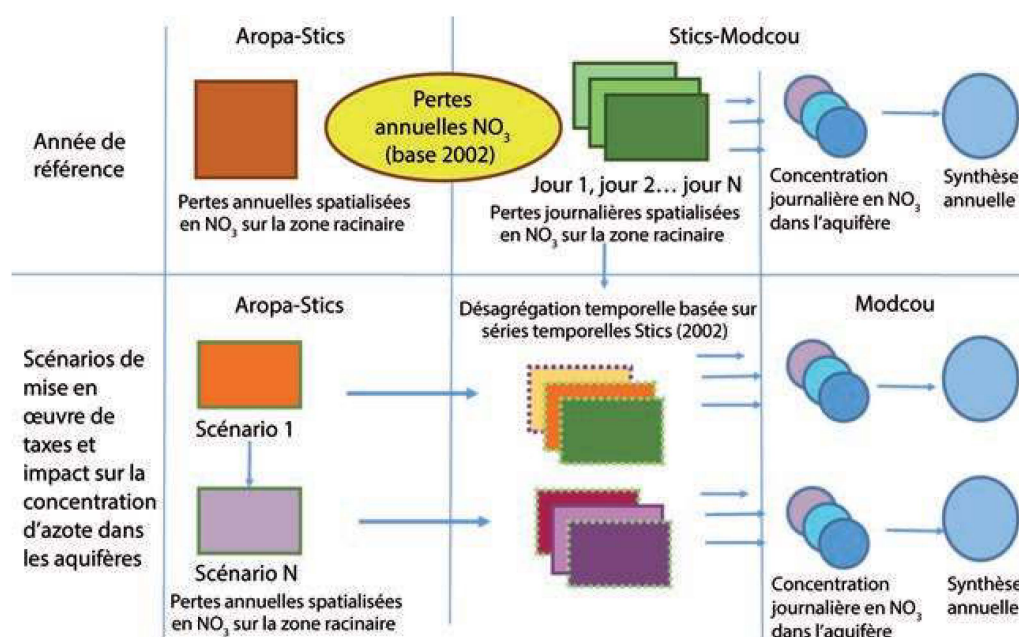


Figure 9.3. « De l'agriculteur à la qualité de la nappe », Schéma du couplage de Stics et de modèles hydrologique (Modcou) et économique (Aropa) dans la plateforme de modélisation du Piren-Seine.

Le code Stics a été porté dans plusieurs plateformes dans et hors de l'Inra :

- son encapsulation dans la plateforme Record permet de proposer un simulateur clé en main du fonctionnement et de la gestion du système de culture. Il sert les problématiques suivantes : gestion des ressources en eau (MouStics), évaluation de services écosystémiques (projet Efese), études d'exploitation d'élevage (Melodie), modélisation du cycle de l'azote à l'échelle du paysage (TNT) ;
- en dehors de l'Inra, Stics est intégré dans la chaîne de modélisation du Piren-Seine, qui simule la production et les bilans C et N en systèmes de grande culture ainsi que leurs impacts à long terme sur les ressources en eau, et dans la plateforme européenne Bioma pour la prédiction de la production fourragère.

Atouts et limites du schéma conceptuel pour des problématiques globales

L'utilisation de Stics à de larges échelles exige une expertise des entrées sol-techniques, comme l'a montré son application à l'échelle du bassin de la Seine (Piren-Seine). Elle conduit aussi à conforter les fonctions de pédotransfert (Inra Infosol et ANR RUDesSols). L'effort de paramétrage peut être orienté par les résultats des études de sensibilité à la résolution spatiale menées sur la plateforme Record (Macsur).

Cette ouverture a été soutenue par le département EA et validée par les demandes de partenaires. Elle a conduit à préciser la gouvernance de Stics, c'est-à-dire garder le cahier des charges et le domaine scientifique initial de Stics, mais aussi favoriser l'interaction avec d'autres disciplines par la modularisation du code et la formation à l'usage.

► Le changement du climat, un cas d'étude emblématique

À la fin des années 1990, évaluer l'impact du changement climatique sur la production agricole est devenu une question primordiale. La résolution des modèles climatiques de l'époque était de l'ordre de 200 km, avant de descendre à

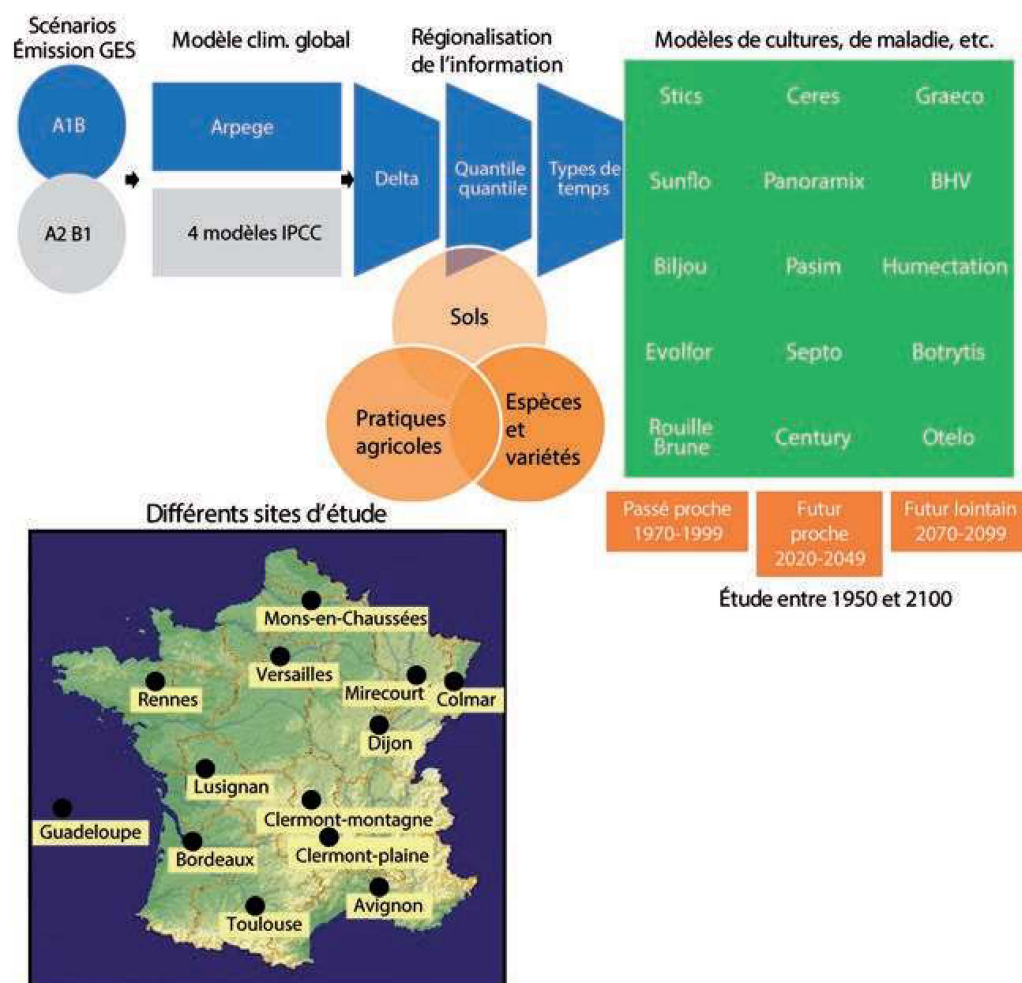


Figure 9.4. Démarche de l'ANR Climator (2007-2010), avec mise en œuvre multisite d'un ensemble de modèles et analyse multicritère des impacts du changement du climat (Brisson et Levraut, 2010).

50 km une dizaine d'années plus tard. Suite à quelques études pionnières menées à l'Inra, la communauté des modélisateurs a eu accès, dès les années 2000, à des séries climatiques à des échelles spatiales compatibles avec les modèles d'impacts, dont Stics. Ainsi, depuis 2010, 18 % des publications recensées intègrent la problématique du changement climatique.

Stics impliqué dans le triple défi : impacts, adaptation et atténuation

Le projet ANR Climator (2007-2010), coordonné par Nadine Brisson, est encore aujourd'hui la seule référence en France sur les impacts du changement climatique et les voies d'adaptation de l'agriculture à l'échelle nationale (figure 9.4). À l'échelle internationale, les actions Cost puis les programmes internationaux AgMIP et JPI-Facce ont permis de comparer l'aptitude des modèles de culture à rendre compte des effets du climat. Stics est positionné sur trois enjeux : estimer les impacts du changement climatique sur l'évolution des fonctions agricoles, concevoir et évaluer des stratégies d'adaptation des pratiques ou des systèmes de cultures, et enfin proposer des voies d'atténuation des émissions de GES par l'agriculture.

Un dialogue interdisciplinaire renouvelé

L'utilisation de Stics dans ce contexte climatique évolutif peut nécessiter de revisiter certains de ses formalismes face aux phénomènes de températures

extrêmes, de stress hydrique prolongé, de concentration en CO₂ atmosphérique accrue, et à leurs interactions. La capacité du modèle à reproduire le microclimat redevient cruciale, car les échanges d'énergie peuvent modifier les extrêmes climatiques au sein du couvert.

L'étude du changement climatique avec le modèle Stics offre également un nouveau cadre méthodologique à d'autres disciplines. Ainsi, la climatologie peut tester indirectement la performance des méthodes de régionalisation des séries climatiques futures. La communauté des climatologues utilise Stics pour mieux représenter la phénologie des agroécosystèmes dans les modèles de climat (couplage Orchidee-Stics). Le domaine du calcul scientifique est nouvellement sollicité pour l'exploration de méthodes d'analyse de sensibilité.

Les questions méthodologiques soulevées

L'usage de Stics est modifié par ce nouveau cadre d'expérimentation numérique en mettant en exergue la nécessité de suivre la propagation des incertitudes associées aux simulations climatiques et d'en quantifier la part dans les prédictions de Stics.

La problématique d'atténuation du changement climatique pousse à avancer dans l'évaluation de la qualité prédictive de Stics dans la simulation du bilan de GES à long terme, en s'appuyant sur des essais internationaux.

L'implication du réseau Stics sur la problématique du changement climatique est exemplaire de la façon dont la place du modèle a évolué au sein du département EA. Stics s'est révélé un outil d'émulation scientifique inter et transdisciplinaire, qui participe à la visibilité scientifique du département EA de l'Inra.

► Les défis d'aujourd'hui : vers un modèle pour l'agroécologie ?

Les systèmes agricoles actuels répondent diversement aux enjeux de durabilité, de compétitivité et de résilience. Plusieurs types d'agriculture combinent différemment les diverses modalités de systèmes techniques (relation aux intrants et production de services écosystémiques) et les relations aux marchés (global *vs* local). Cela appelle à positionner le modèle : Stics a été majoritairement appliqué à des systèmes agricoles conventionnels, mais pas exclusivement. Il peut contribuer à mieux connaître le fonctionnement des systèmes agricoles non intensifs et d'agriculture biologique, sous réserve d'hypothèses bien formalisées sur le rôle des facteurs biotiques.

Du modèle de culture agroenvironnemental au *cropping system model*

Grâce à son cahier des charges et à sa construction collective, Stics a pu prendre sa place dans la chaîne d'intégration des connaissances, aux échelles du cycle cultural et de la rotation culturale. À l'échelle du cycle, par exemple, la complémentarité entre modèles spécialisés par espèce et Stics pourrait être valorisée, tant sur le plan cognitif qu'opérationnel (ex. : le projet KIC Climate-Barley IT mobilisant Sirius-Quality, Monica et Stics). À l'échelle de la rotation culturale, le principal atout de Stics, lié à sa généricité interspécifique, est de permettre l'évaluation et/ou l'optimisation de stratégies de gestion de culture sur des critères agroenvironnementaux intégrant à la fois le temps court et le temps long (figure 9.5).

Contribuer au développement de l'agroécologie et de l'agroforesterie ?

Stics a déjà été appliqué en arboriculture, en agroforesterie, en agriculture biologique ou de « conservation des sols » pour quantifier des services écosystémiques. Ces applications ont mobilisé des hypothèses simplificatrices sur le fonctionnement du système ou un couplage avec un autre modèle. Elles dépassent le domaine de définition de Stics, qui intègre seulement les cultures et la biomasse microbienne du sol comme acteurs biologiques, *a contrario* d'autres agents biotiques comme ceux de la régulation *top-down* des bioagresseurs par exemple.

Une modélisation globale de systèmes agroécologiques mobilisera probablement l'ingénierie de la connaissance et/ou le couplage de modèles. Stics pourra y contribuer par l'évaluation multicritère, en quantifiant les services écosystémiques liés aux bilans eau, C, N des compartiments sol-cultures-atmosphère et en prédisant les fonctions trophiques potentielles assurées par les végétaux. Dans cette optique, la modélisation du phosphore est une nouvelle priorité de l'équipe projet pour Stics, afin de dépasser le domaine d'application actuel. Par ailleurs, des initiatives de modélisation montrent la voie de la prise en compte de la biodiversité dans le fonctionnement des agroécosystèmes en explicitant les interactions entre les plantes cultivées, les bioagresseurs et leurs ennemis, ou le rôle des groupes microbiens dans les cycles des nutriments.

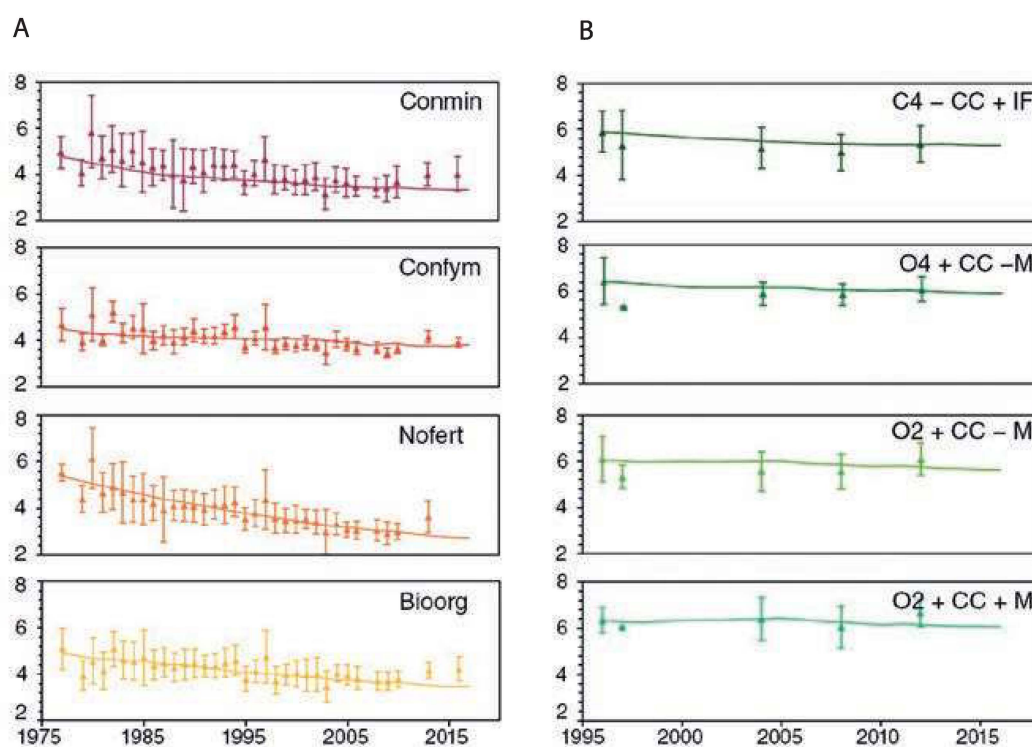


Figure 9.5. Simulation, avec la version de recherche « pérenne » de Stics, de l'évolution à long terme des stocks de N organique (Mg N/ha) observés dans les essais DOK, à Terwil, Suisse (A), et Organic, à Foulum, Danemark (B). Les systèmes conventionnels sont Conmin, Confym, C4, et les systèmes agri-biologiques sont Nofert, Bioorg, O2, O4.

Source : Autret, 2017. Quantification and modelling of carbon and nitrogen fate in alternative cropping systems experiments on the long term. Thèse de doctorat de l'UE et de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier de France, 183 p + annexes.

Entre science et action, entre national et international, des tensions à gérer

La construction collective et la portabilité de Stics ouvrent des champs thématiques nouveaux dont la priorisation repose sur un dialogue entre l'équipe projet Stics, des chercheurs spécialistes et la hiérarchie de l'Inra.

Assurer la robustesse de la version standard, répondre aux besoins croissants d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et conforter le statut de modèle international de Stics comme *cropping system model* restent des défis actuels.

Prendre en compte des thématiques scientifiques et des pratiques de l'agroécologie appelle à pousser encore plus au large : comment associer des modèles, en construire une nouvelle génération pour rendre explicite le rôle de la biodiversité, cultivée et associée, et des interactions écologiques avec les processus socio-économiques ? La force et les acquis de l'épopée Stics peuvent y contribuer, en sachant garder raison...

Remerciements

Les auteurs remercient les anciens membres de l'équipe projet Stics (Jean-Claude Poupa et Martine Guérif), Richard Delécolle, interlocuteur de la première heure de Nadine Brisson, ainsi que tous les doctorants, chercheurs en CDD, stagiaires et autres collègues chercheurs qui ont contribué à l'avancée du modèle Stics. Nous nous souvenons avec reconnaissance du regretté Dominique King, coanimateur inspiré de l'Action incitative programmée Ecospace. Enfin, nous remercions sincèrement Gilles Lemaire, relecteur mandaté par le chef de département, pour son aide concrète et ses conseils éclairés sur cette rédaction.

Pour en savoir plus

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Gate P. *et al.*, 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I- Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.

Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. *Conceptual basis, formalisations and parametrization of the STICS crop model*, Éditions Quæ, coll. Update, 304 p.

Brisson N., Levrault F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet Climator (2007-2010)*, Ademe, 336 p.

Coucheney E., Buis S., Launay M., Constantin J., Mary B., Garcia de Cortazar-Atauri I. *et al.*, 2015. Accuracy, robustness and behavior of the STICS 8.2.2 soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs: evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France. *Environmental Modelling and Software*, 64, 177-190.

Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C. *et al.*, 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen des cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Étude, Inra (France), Rapport complet 400 p., <http://www6.paris.inra.fr/depe/Projets/Cultures-Intermediaires>.